

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2003-344024

(43)Date of publication of application : 03.12.2003

(51)Int. CI.

G01B 11/06

(21)Application number : 2002-147107 (71)Applicant : SHIMADZU CORP

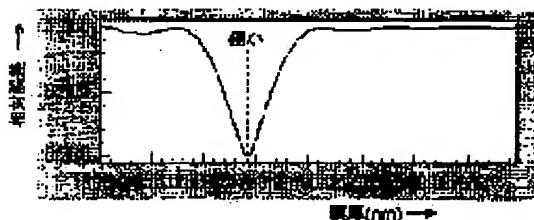
(22)Date of filing : 22.05.2002 (72)Inventor : SHINYA KAZUYA

## (54) METHOD AND APPARATUS FOR MEASURING THICKNESS OF FILM

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To improve the accuracy of measuring thickness of a film by using a spectrometer.

SOLUTION: A measured spectrum waveform can be approximately represented by a linear sum of multiple basic spectra depending on a waveform feature of an interference spectrum. Therefore, such an approximate spectrum which gives a minimum square error relative to the measured spectrum is found for each thickness of the film, by using basic spectra previously determined in which the thickness of the film is set as a variable, and a relation between the least square error and the thickness of the film is represented as a graph. The thickness of the film which gives the minimum point in the graph of the least square error, is regarded as the thickness of a sample film.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination]

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

[Date of final disposal for application]

[Patent number]

[Date of registration]

[Number of appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of requesting appeal against examiner's decision of rejection]

[Date of extinction of right]

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-344024

(P2003-344024A)

(43) 公開日 平成15年12月3日 (2003. 12. 3)

(51) Int.Cl.<sup>7</sup>

識別記号

F I

テマコート\* (参考)

G 0 1 B 11/06

G 0 1 B 11/06

G 2 F 0 6 5

審査請求 未請求 請求項の数 8 O L (全 8 頁)

(21) 出願番号 特願2002-147107 (P2002-147107)

(22) 出願日 平成14年5月22日 (2002. 5. 22)

(71) 出願人 000001993

株式会社島津製作所

京都府京都市中京区西ノ京桑原町1番地

(72) 発明者 新屋 和也

京都市中京区西ノ京桑原町1番地 株式会

社島津製作所内

(74) 代理人 100095670

弁理士 小林 良平

Fターム (参考) 2F065 AA30 BB17 FF52 GG02 GG24

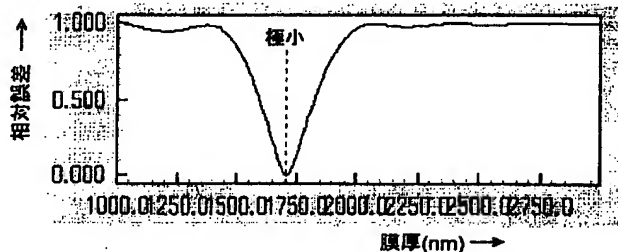
LL67 QQ25 QQ41 RR03 UU05

(54) 【発明の名称】 膜厚測定方法及び膜厚測定装置

(57) 【要約】

【課題】 分光測定を用いた膜厚測定の精度の向上を図る。

【解決手段】 干渉スペクトルの波形形状の特徴により、測定スペクトル波形は複数の基底スペクトルの線形和で近似表現できる。そこで、予め膜厚を変数として定めておいた基底スペクトルを用い、各膜厚において、測定スペクトルに対する二乗誤差が最小になるような近似スペクトルを見つけ、その最小二乗誤差と膜厚との関係をグラフとして求める。そして、最小二乗誤差の極小点を与える膜厚をその試料膜の膜厚とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 試料膜に対して測定光を照射し、膜表面で反射する反射光と、膜中を透過して反対側の境界面で反射する透過反射光とによる干渉光のスペクトルを取得し、該測定スペクトルに基づいて試料膜の膜厚を求める膜厚測定方法において、測定スペクトルの波形形状を近似する近似スペクトルの生成情報として、膜厚を変数として含む関数又は演算式を予め用意しておき、測定スペクトルに基づいて膜厚を算出する際に、

未知である膜厚を想定し、その想定膜厚において前記生成情報を用いて生成される近似スペクトルと測定スペクトルとの誤差に基づいて最適近似を行い、該想定膜厚における最小二乗誤差を求める誤差取得処理と、

前記想定膜厚を変化させる毎に前記誤差取得処理を実行することにより、前記最小二乗誤差を順次求める誤差変動情報取得処理と、

該誤差変動情報から極小点を与える1乃至複数の膜厚を見い出す膜厚取得処理と、

を含むことを特徴とする膜厚測定方法。

【請求項2】 前記近似スペクトルの生成情報は、膜厚を変数として含む、基底スペクトルの線形和による近似演算式であることを特徴とする請求項1に記載の膜厚測定方法。

【請求項3】 前記近似スペクトルの生成情報には複数の膜厚をそれぞれ変数として含み、前記誤差取得処理では、複数の想定膜厚の組み合わせにおける最小二乗誤差を求め、誤差変動情報取得処理では、複数の想定膜厚の組み合わせを変化させる毎に前記誤差取得処理を実行することを特徴とする請求項1又は2に記載の膜厚測定方法。

【請求項4】 前記試料膜は同一膜が複数の膜厚を有して成るものであることを特徴とする請求項1～3のいずれかに記載の膜厚測定方法。

【請求項5】 試料膜に対して測定光を照射し、膜表面で反射する反射光と、膜中を透過して反対側の境界面で反射する透過反射光とによる干渉光のスペクトルを取得し、該測定スペクトルに基づいて試料膜の膜厚を求める膜厚測定装置において、

a)測定スペクトルの波形形状を近似する近似スペクトルの生成情報として、膜厚を変数として含む関数、演算式又はそれに相当する情報を予め格納しておく記憶手段と、

b)未知である膜厚を想定し、その想定膜厚において前記生成情報を用いて生成される近似スペクトルと測定スペクトルとの誤差に基づいて最適近似を行い、該想定膜厚における最小二乗誤差を求める誤差取得手段と、

c)前記想定膜厚を変化させる毎に前記誤差取得手段による処理を実行することにより、前記最小二乗誤差を順次求める誤差変動情報取得手段と、

d)該誤差変動情報から極小点を与える1乃至複数の膜厚

を見い出す膜厚取得手段と、

を備えることを特徴とする膜厚測定装置。

【請求項6】 前記近似スペクトルの生成情報は、膜厚を変数として含む、基底スペクトルの線形和による近似演算式であることを特徴とする請求項5に記載の膜厚測定装置。

【請求項7】 前記近似スペクトルの生成情報には複数の膜厚をそれぞれ変数として含み、前記誤差取得手段は、複数の想定膜厚の組み合わせにおける最小二乗誤差を求め、前記誤差変動情報取得手段は、複数の想定膜厚の組み合わせを変化させる毎に前記誤差取得手段による処理を実行することを特徴とする請求項5又は6に記載の膜厚測定装置。

【請求項8】 前記試料膜は同一膜が複数の膜厚を有して成るものであることを特徴とする請求項5～7のいずれかに記載の膜厚測定装置。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、分光測定を利用して試料膜の膜厚を測定するための膜厚測定方法及び膜厚測定装置に関する。本発明に係る膜厚測定方法及び膜厚測定装置は、例えば、半導体製造工程などにおいてウエハ基板上に形成された各種薄膜の膜厚の検査等の各種分野で広く利用することができる。

## 【0002】

【従来の技術】紫外光、可視光又は赤外光を利用した分光光度計の応用分野の一つとして、薄膜状の試料に対する膜厚の測定がある。分光測定を用いた膜厚測定の基本原理は次の通りである。

【0003】図11に示すように、膜状の試料Sに対して単一波長の測定光を入射すると、その一部は試料Sの表面S1で反射され、残りは試料S内部に入り込んで、その一部は光の入射面とは反対側の境界面S2で反射して試料S内部を再び戻り、試料Sの表面S1から外部へと出射する。前者の反射光と後者の透過反射光とでは光路差が生じるため、測定光の波長と膜厚とに応じた干渉が発生する。測定光の波長を所定範囲で走査したとき、波数（又は波長）を横軸に、干渉光の強度を縦軸にとってグラフを描くと、波状の干渉スペクトル波形が得られる。この干渉スペクトル波形は余弦関数で表すことができ、その余弦関数の周期は膜厚に対応したものとなる。

【0004】そこで、干渉スペクトル波形を利用して、そのピークの山又は谷に対応する波数を自動又は手動で読み取り、それらの波数間隔情報を最小二乗法などにより求め、試料Sに対する既知の屈折率nを利用して波数周期から膜厚を算出する。

## 【0005】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、分光測定によって得られる干渉スペクトル波形は、種々の要因のために、理想的な余弦波形となることは殆どない。こ

うした干渉スペクトル波形を乱す要因としては、例えば、干渉効率の波数依存性、光源のエネルギー分布の波数依存性、装置の各種ノイズなどが考え得る。従来の膜厚の計算方法ではこうした要因が考慮されておらず、理想的な余弦波形となることを前提として膜厚を算出しているため、膜厚の算出精度を高めることが困難であった。

【0006】また、従来は膜厚が或る1種類であることを前提として計算を行っている。しかしながら、例えば、CMP (Chemical Mechanical Polishing) 装置などへの応用を考えると、意図的に複数の膜厚を持つように形成された試料膜に対して、その複数の膜厚を精度よく求め、適宜の時点で研磨を停止することが必要となる。上記のような従来の方法では、こうした要求には対応することが不可能であった。

【0007】本発明はこのような点に鑑みて成されたものであり、その第1の目的とするところは、従来よりも膜厚の算出精度を大幅に向上させることができる膜厚測定方法及び膜厚測定装置を提供することにある。

【0008】また、本発明の第2の目的とするところは、試料上の測定領域内に複数種類の膜厚を有するような試料膜に対しても、それぞれの膜厚を精度よく算出することができる膜厚測定方法及び膜厚測定装置を提供することにある。

【0009】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するために成された第1発明は、試料膜に対して測定光を照射し、膜表面で反射する反射光と、膜中を透過して反対側の境界面で反射する透過反射光とによる干渉光のスペクトルを取得し、該測定スペクトルに基づいて試料膜の膜厚を求める膜厚測定方法において、測定スペクトルの波形形状を近似する近似スペクトルの生成情報として、膜厚を変数として含む関数又は演算式を予め用意しておき、測定スペクトルに基づいて膜厚を算出する際に、未知である膜厚を想定し、その想定膜厚において前記生成情報を用いて生成される近似スペクトルと測定スペクトルとの誤差に基づいて最適近似を行い、該想定膜厚における最小二乗誤差を求める誤差取得処理と、前記想定膜厚を変化させる毎に前記誤差取得処理を実行することにより、前記最小二乗誤差を順次求める誤差変動情報取得処理と、該誤差変動情報から極小点を与える1乃至複数の膜厚を見い出す膜厚取得処理と、を含むことを特徴としている。

【0010】また、第2発明は上記第1発明に係る膜厚測定方法を具現化する装置であって、試料膜に対して測定光を照射し、膜表面で反射する反射光と、膜中を透過して反対側の境界面で反射する透過反射光とによる干渉光のスペクトルを取得し、該測定スペクトルに基づいて試料膜の膜厚を求める膜厚測定装置において、

a) 測定スペクトルの波形形状を近似する近似スペクトル

$$f(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 (1/x) \sin(\omega x + \delta) \quad \dots(1)$$

の生成情報として、膜厚を変数として含む関数、演算式又はそれに相当する情報を予め格納しておく記憶手段と、

b) 未知である膜厚を想定し、その想定膜厚において前記生成情報を用いて生成される近似スペクトルと測定スペクトルとの誤差に基づいて最適近似を行い、該想定膜厚における最小二乗誤差を求める誤差取得手段と、

c) 前記想定膜厚を変化させる毎に前記誤差取得手段による処理を実行することにより、前記最小二乗誤差を順次求める誤差変動情報取得手段と、

d) 該誤差変動情報から極小点を与える1乃至複数の膜厚を見い出す膜厚取得手段と、を備えることを特徴としている。

【0011】また、上記膜厚測定方法及び膜厚測定装置において、前記近似スペクトルの生成情報は、膜厚を変数として含む、基底スペクトルの線形和による近似演算式であるものとすることができる。

【0012】また、特に、複数種類の膜厚を有している試料膜の各膜厚を精度よく算出するために、第1発明に係る膜厚測定方法において、前記近似スペクトルの生成情報には複数の膜厚をそれぞれ変数として含み、前記誤差取得処理では、複数の想定膜厚の組み合わせにおける最小二乗誤差を求め、誤差変動情報取得処理では、複数の想定膜厚の組み合わせを変化させる毎に前記誤差取得処理を実行するものとすると好ましい。

【0013】同様に、第2発明に係る膜厚測定装置において、前記近似スペクトルの生成情報には複数の膜厚をそれぞれ変数として含み、前記誤差取得手段は、複数の想定膜厚の組み合わせにおける最小二乗誤差を求め、前記誤差変動情報取得手段は、複数の想定膜厚の組み合わせを変化させる毎に前記誤差取得手段による処理を実行する構成とすることが好ましい。

【0014】

【発明の実施の形態】まず、第1発明に係る膜厚測定方法において、分光測定の結果として得られた干渉スペクトル波形に基づいて膜厚を算出する膜厚算出方法の原理を説明する。

【0015】〔第1の膜厚算出方法〕いま、或る試料膜を測定した結果得られる干渉スペクトルの一例を図3に示す。この干渉スペクトルの波形から、次のようなことが把握できる。

(i) 一定周期の干渉波パターンが存在する

(ii) オフセットが存在する

(iii) 右上がりにほぼ線形のドリフトが存在する

(iv) 干渉効率のため、波数が大きいほど干渉波の振幅が小さくなる

こうした点を考慮すると、干渉波の周期 $\omega$ が既知であれば、干渉スペクトル波形は次の(1)式で近似できると予測される。

上記(1)式において、右辺の第1項はオフセットを反映し、第2項はドリフトを反映し、第3項は波形状の周期性波形を反映している。更に詳しく言えば、第3項の中の $(1/x)$ の部分は波数増加に伴う振幅の減少を反映し、 $\delta$ は特に膜厚が大きい場合に顕著になる位相ずれを\*

$$f(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 (1/x) \sin \omega x + \alpha_3 (1/x) \cos \omega x \quad \cdots (2)$$

すなわち、4つの関数 $f_0(x)$ 、 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ を、

$$f_0(x) = 1$$

$$f_1(x) = x$$

$$f_2(x) = (1/x) \sin \omega x$$

※

$$f(x) = \alpha_0 f_0(x) + \alpha_1 f_1(x) + \alpha_2 f_2(x) + \alpha_3 f_3(x) \quad \cdots (3)$$

【0017】上記説明では周期 $\omega$ が既知であるとしたが、実際にはこの $\omega$ 自体が未知である(正確に把握できない)。上記のような近似による近似スペクトル $f(x)$ が測定スペクトル $g(x)$ に最適に近似された状態というのは、両者の二乗誤差が最小であることと同意である。そこで、周期 $\omega$ を変数とし、周期 $\omega$ を変化させる毎に二乗誤差が最小となるような近似スペクトルを見つけてそのときの最小二乗誤差を取得し、周期 $\omega$ を変化させたと★20

$$d[\text{cm}] = \Delta m / \{2 \cdot (n^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} (1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)\} \quad \cdots (4)$$

ここで、 $\Delta m$ は、波長 $\lambda_1$ のピークを基点として短波長側へピークを順次数えていったときに、波長 $\lambda_2$ のピークが何番目に現われるかを示す数であり、通常は $\Delta m = 1$ とすればよい。

$$\text{【0019】周期 } T[\text{cm}^{-1}] = 1/\lambda_2 - 1/\lambda_1$$

を用いると(4)式は、

$$d = 1/2 \cdot (n^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} T$$

であり、これを変形すると、

$$T = 1 / \{2 \cdot (n^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} d\} = 1 \times 10^7 / \{2 \cdot 30 (n^2 - \sin^2 \theta)^{1/2} d'\} \quad \cdots (5)$$

となる。但し、 $d'$ は単位がcmである $d$ を単位nmで表現したものである。いま $\theta = 0$ とすれば、 $\sin \theta$ の項は無視できるから、次の(5)式の関係が成り立つ。

$$T = 1 \times 10^7 / (2 \cdot n \cdot d') \quad \cdots (5)$$

一例として、屈折率 $n : 1.466$ 、膜厚 $300\text{nm}$ のときの周期 $T$ を計算すると、

$$T = 1 \times 10^7 / 2 \times 1.466 \times 300 = 11368 \text{cm}^{-1}$$

である。

【0020】(5)式で表したように、周期 $T$ は膜厚 $d'$ の 40

\*反映している。

【0016】ここで、

$$\sin(\omega x + \delta) = \sin \omega x \cos \delta + \cos \omega x \sin \delta$$

であるから、(1)式は(2)式に変形することができる。

$$\text{※ } f_3(x) = (1/x) \cos \omega x$$

と定義すれば、測定によって取得された測定スペクトル $g(x)$ は、上記4つの関数の線形和である、式(3)のよう

10 に表される関数 $f(x)$ で近似表現できる筈である。

★きの最小二乗誤差の変化において、最小二乗誤差が最も小さくなったときの周期 $\omega$ が求めようとする周期である可能性が極めて高い。

【0018】さて、ここで、試料膜の膜厚と干渉波形の周期との関係を考えてみる。従来から知られているように、屈折率 $n$ である試料膜に入射角 $\theta$ で測定光が入射したとき(図11参照)に得られる反射光に基づいて膜厚 $d$ を算出する際の基本式は、次の(4)式である。

関数である。したがって、上述したように未知の周期 $\omega$ を変数とすることは、未知の膜厚を変数とすることに置き換えられる。一方、上述したように、周期が既知であれば、測定スペクトル $g(x)$ は近似スペクトル $f(x)$ で良好に近似することができる。そこで、近似スペクトルの表現として基底スペクトルを導入し、測定スペクトル $g(x)$ と近似スペクトル $f(x)$ との誤差を表す誤差関数を、膜厚 $d'$ を変数として求めることを考える。

【0021】いま、測定スペクトルと近似スペクトルとの測定点をそれぞれ、

【数1】

$$Y = \begin{pmatrix} y_0 \\ y_1 \\ \vdots \\ y_{N-1} \end{pmatrix} \quad X = \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ \vdots \\ x_{N-1} \end{pmatrix}$$

とする。この $X$ 、 $Y$ を用い、誤差関数 $\varepsilon(d')$ を次の(6)式で定義する。

【数2】

$$\varepsilon(d') = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (Y_i - Y'_i)^2} \quad \dots(6)$$

$$Y' = A(A^T A)^{-1} A^T Y \quad \dots(6-1)$$

$$A(d') = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{x_0} \cos \frac{2\pi}{T(d')} x_0 & \frac{1}{x_0} \sin \frac{2\pi}{T(d')} x_0 & 0 \\ 1 & \frac{1}{x_1} \cos \frac{2\pi}{T(d')} x_1 & \frac{1}{x_1} \sin \frac{2\pi}{T(d')} x_1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \frac{1}{x_{N-1}} \cos \frac{2\pi}{T(d')} x_{N-1} & \frac{1}{x_{N-1}} \sin \frac{2\pi}{T(d')} x_{N-1} & N-1 \end{bmatrix} \quad \dots(6-2)$$

【0022】上記(6-2)式において、 $T(d')$ は上記(5)式による $d'$ を変数としたときの周期 $T$ である。すなわち、膜厚 $d'$ が決まれば(6-2)式で表現される基底スペクトルが定まるから、(6)式による二乗誤差が最小になるように測定点を見い出すことができる。したがって、膜厚として或る値を仮定すれば、測定スペクトル（原波形）に対する二乗誤差が最小となるような近似スペクトルを見つけることができ、その膜厚に対する最小二乗誤差が求まる。

【0023】このようにして所定の膜厚範囲で所定膜厚間隔毎に、それぞれの膜厚に対して基底を定義し、その基底による最小二乗誤差を求め、膜厚に対して最小二乗誤差を順次プロットしてゆくと図4に示すようになる。図4に描出したカーブによれば、膜厚が約1750nmのところに最小二乗誤差の極小点（ピークトップ）が存在する。すなわち、膜厚が1750nmであるときに近似スペクトル $f(x)$ は測定スペクトル $g(x)$ に最も類似した形状になるから、求めるべき膜厚は1750nmであると結論付けることができる。

【0024】上記のような膜厚算出方法が確かであることを検証するために、1750nmの膜厚を与える周期を式(5)より求めると、 $T=1950\text{cm}^{-1}$ である。このときの近似スペクトルを測定スペクトルに重ねて描くと、図5に示すようになる。測定スペクトルの原波形はほぼ2000 $\text{cm}^{-1}$ 毎にピークを持っており、オフセットやドリフト、波形の振幅の減衰状態まで含めて、かなり高い精度で近似できていることがわかる。したがって、上記方法により算出される膜厚の精度は高いことがわかる。

【0025】上記説明は試料膜の厚さが均一（単一膜厚）であることを前提としているが、同一膜であって膜厚が2つ以上存在している場合には、干渉スペクトル波形のピークは周期的には出現せず、その出現は後述の図9に示すように不規則となる。例えば、図6に示すように、測定対象の試料膜の膜厚が $d_1$ 、 $d_2$ の2つ存在する場合、上記のような解析処理を行って膜厚と最小二乗誤差との関係を求めると、図7に示すようになる。すなわち、膜厚と最小二乗誤差との関係を表すカーブには、2個の極小点が現れる。この2つのピークが目視等によっ

て明らかに分離可能である場合には、それぞれのピークトップの位置から2つの膜厚を求めることができる。

【0026】一方、2つの膜厚 $d_1$ 、 $d_2$ がかなり近い場合には、図8に示すように2つピークの一部が重なり合っていて、目視上ではピークトップの位置が正確に把握できなくなることがある。そのような場合には、所定の演算処理を実行して第1、第2なる2つのピークを分離し、それぞれのピークトップの位置から膜厚を求めればよい。

【0027】〔第2の膜厚算出方法〕上述したように、上記第1の膜厚算出方法でも複数の膜厚を同時に求めることは可能である。しかしながら、(3)式及び(6-2)式は、元々、単一膜厚であるという前提の下での近似表現であるため、複数膜厚に対しては精度の高い近似は難しいという限界がある。図9は、測定スペクトルと上記第1の膜厚算出方法において求めた最適近似スペクトルとを重ねて示した図である。このように近似スペクトルは、測定スペクトルを良好に近似しているとは言いがたい。そこで、存在する膜厚の数が既知である場合には、この第2の膜厚算出方法を用いることにより、一層高い精度で複数の膜厚をそれぞれ求めることができる。

【0028】この第2の膜厚算出方法でも、基本的な解析処理の原理は上記第1の膜厚算出方法と同様である。異なる点は、測定スペクトル $g(x)$ を予め複数の膜厚を想定した基底スペクトルの線形和で近似表現すること、そして、複数の膜厚をそれぞれ或る値に仮定した条件で、二乗誤差が最も小さくなるような近似スペクトル $f(x)$ を見つけることである。

【0029】具体的に説明すると、いま膜厚が2つ存在することが既知である場合、それぞれの膜厚 $d_1$ 、 $d_2$ に対応する周期 $\omega_1$ 、 $\omega_2$ を用いれば、干渉スペクトル波形は次式で近似できると予測できる。

$$f(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 (1/x) \sin(\omega_1 x + \delta_1) + \alpha_3 (1/x) \sin(\omega_2 x + \delta_2)$$

したがって、上記第1の膜厚算出方法と同様に、 $\sin$ 項を分解すれば、

$$f(x) = \alpha_0 + \alpha_1 x + \alpha_2 (1/x) \sin \omega_1 x + \alpha_3 (1/x) \cos \omega_1 x + \alpha_4 (1/x) \sin \omega_2 x + \alpha_5 (1/x) \cos \omega_2 x$$

$s\omega 2$

とすることができる。

【0030】すなわち、6つの関数  $f_0(x)$ ,  $f_1(x)$ ,  $f_2(x)$ ,  $f_3(x)$ ,  $f_4(x)$ ,  $f_5(x)$ を、

$$f_0(x) = 1$$

$$f_1(x) = x$$

$$f_2(x) = (1/x) \sin \omega 1 x$$

\*

$$f(x) = \alpha_0 f_0(x) + \alpha_1 f_1(x) + \alpha_2 f_2(x) + \alpha_3 f_3(x) + \alpha_4 f_4(x) + \alpha_5 f_5$$

(x) ... (7)

【0031】この場合にも、上記(6)、(6-1)、(6-2)式と同様の形式の基底スペクトルの線形和の形式での表現が可能である。但し、(6)、(6-1)、(6-2)式では変数は1つの膜厚であったのに対し、ここで、膜厚  $d_1$ ,  $d_2$  がともに変数となる。したがって、測定スペクトル  $g(x)$  と近似スペクトル  $f(x)$  との二乗誤差を算出する際には、2つの膜厚  $d_1$ ,  $d_2$  をそれぞれ個別に仮定する必要がある。すなわち、一方の膜厚、例えば  $d_1$  を固定し、他方の膜厚  $d_2$  を順次所定間隔毎に変化させていったときに、それぞれ最小二乗誤差を求める作業が必要である。

【0032】こうした処理の結果、膜厚の組 ( $d_1$ ,  $d_2$ ) に対して最小二乗誤差が求まるから、膜厚と最小二乗誤差との関係は第1の膜厚算出方法のように2次元グラフでは表すことができず、2つの膜厚を2軸とし、最小二乗誤差を他の1軸とする3次元空間内の表現となる。図10はこうした膜厚と最小二乗誤差との関係を示す図である。図10において膜厚  $d_1$ 、膜厚  $d_2$  の2軸と直交する方向（紙面に垂直な方向）に二乗誤差を示す曲面が存在する。このようにして、 $d_1 = d_2$  以外の部分で極小となる ( $d_1$ ,  $d_2$ ) を探し、それを求める2つの膜厚とすればよい。

【0033】もちろん、この方法を更に拡張して、3以上の膜厚を同時に算出することも可能である。また、元々、存在する膜厚の数が不明である場合には、第1の膜厚算出方法により膜厚の数を調べ、膜厚の数を特定した後第2の膜厚算出方法を適用すれば、正確な膜厚算出が行える。

【0034】次に、上記のような膜厚算出方法を採用した膜厚測定装置の一実施例について説明する。図1は本実施例による膜厚測定装置の概略構成図である。

【0035】この膜厚測定装置は、分光測定部として、光源1、分光部2、測定光学系3、光検出器4を含み、光検出器4による検出信号はスペクトル作成部5に与えられ、該スペクトル作成部5により作成された干渉スペクトルが演算処理部6に与えられて、後述するような所定の演算処理が実行されることにより膜厚が算出される。なお、スペクトル作成部5及び演算処理部6の実体は、CPUを中心に構成されるパーソナルコンピュータであって、該コンピュータ上で所定のプログラムを実行することにより演算処理が達成される。

$$* f_3(x) = (1/x) \cos \omega 1 x$$

$$f_4(x) = (1/x) \sin \omega 2 x$$

$$f_5(x) = (1/x) \cos \omega 2 x$$

と定義すれば、測定スペクトル  $g(x)$  は、上記6つの関数の線形和で(7)式のように表される関数  $f(x)$  で近似表現できる筈である。

【0036】上記構成の動作を概略的に説明すると、まず光源1から発した白色光の中から、分光部2により特定の波長を有する単色光が取り出され、測定光学系3を介して膜状の試料Sに測定光として照射される。試料Sの表面や裏面などで反射した光は測定光学系3を介して光検出器4に導入され、これら反射光の強度に応じた電気信号がスペクトル作成部5に送られる。後述するように試料Sからの反射光は干渉光となるから、スペクトル作成部5は、測定光の波長走査に対応して光検出器4で得られる信号に基づいて、横軸が波数（又は波長）、縦軸が相対強度である干渉スペクトルを作成する。これが上記測定スペクトルに相当する。

【0037】演算処理部6はこの干渉スペクトルを受け取り、上記のような第1又は第2の膜厚算出方法に基づく演算処理を実行する。ここでは第1の膜厚算出方法に基づく演算処理について説明するが、第2の膜厚算出方法に基づく演算処理も同様に具現化できることは明らかである。図2は、演算処理の具体的な処理手順を示すフローチャートである。

【0038】まず、演算条件として、外部より膜厚範囲  $d_a \sim d_b$  と膜厚間隔  $\Delta d$  を指示する（ステップS1）。予めおおよその膜厚が既知である場合には、その膜厚を含むように適宜の膜厚範囲  $d_a \sim d_b$  を設定することにより、演算時間を短縮することが可能である。また、算出精度の点からは膜厚間隔  $\Delta d$  を小さくすることが好ましいが、膜厚間隔  $\Delta d$  を小さくするほど演算時間が長くなるから、必要な精度との兼ね合いで適宜に決めるとよい。

【0039】実際に演算処理が開始されると、まず計算上の想定膜厚  $d$  を  $d_a$  に設定し（ステップS2）、上述したような最小二乗法により、測定スペクトル  $g(x)$  に対する二乗誤差  $\varepsilon$  が最小となるような近似スペクトル  $f(x)$  を探索する。そして、その近似スペクトルが与える最小二乗誤差を取得する（ステップS3）。

【0040】次に、そのときの想定膜厚  $d$  が  $d_b$  以上であるか否かを判定し（ステップS4）、 $d_b$  未満であれば、 $d + \Delta d$  を新たな想定膜厚  $d$  とし（ステップS5）、ステップS3へと戻る。そして、ステップS4で想定膜厚  $d$  が  $d_b$  以上であると判定されるまで、ステップS3、S4、S5なる処理を繰り返す。これにより、膜厚範囲  $d_a \sim d_b$  内で  $\Delta d$  間隔毎に二乗誤差が最小にな

るような近似スペクトルが探索され、それに対応する最小二乗誤差が順次取得される。

【0041】その結果、図4に示したような、膜厚と最小二乗誤差との関係を示すカーブが得られる(ステップS6)。そして、そのカーブにおいて極小点を探し、極小点を与える膜厚を取得する(ステップS7)。このようにして、高い精度で膜厚を算出することができる。

【0042】膜厚が複数である場合でも、基本的に同様の手順で測定スペクトルから膜厚を算出できることは、既述の説明から明らかである。

【0043】なお、上記実施例は本発明の一例にすぎず、本発明の趣旨の範囲で適宜変更や修正を行えることは明らかである。

【0044】例えば、上記説明において近似スペクトルを表現するための基底のとり方は任意であって、上記記載のものに限らない。また、特に膜厚が薄い場合には、干渉スペクトル波形において明確な周期を持つピークが得られにくい傾向にある。このような場合には、基底としてsin項や $1/x$ 項を除外するほうが良好な近似が行い易い。また、それ以外にも、(3)式又は(7)式に示した関数 $f_0(x)$ 、 $f_1(x)$ 、 $f_2(x)$ 、 $f_3(x)$ 、 $f_4(x)$ 、 $f_5(x)$ の各項を適宜に変形又は加減することにより、近似精度を一層向上させることができる。

【0045】

【発明の効果】以上説明したように、第1発明に係る膜厚測定方法及び第2発明に係る膜厚測定装置によれば、様々な要因によって測定スペクトルに現れるオフセット、ドリフト、位相ずれ、周期性波形の振幅変化などの各種要素が考慮されるため、膜厚の算出精度が大幅に向上する。また、従来は、その測定領域内に複数種類の膜厚を有するような試料に対してその複数膜厚を同時に測定することは実質的に不可能であったが、このような測定も可能となり、しかも高い精度でもって複数の膜厚を

算出することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の一実施例である膜厚測定装置の概略構成図。

【図2】 本実施例の膜厚測定装置における膜厚算出の具体的な処理手順を示すフローチャート。

【図3】 或る試料膜を分光測定した結果得られる干渉スペクトル波形の一例を示す図。

【図4】 本発明の膜厚測定方法により得られる、膜厚とスペクトル近似の最小二乗誤差との関係の一例を示すグラフ。

【図5】 測定スペクトルと本発明の膜厚測定方法で求められる近似スペクトルとを重ねて示した図。

【図6】 2つの膜厚を有する試料膜の断面構造の一例を示す図。

【図7】 試料膜が2つの膜厚を有する場合の膜厚とスペクトル近似の最小二乗誤差との関係の一例を示す図。

【図8】 2つの膜厚が近い場合のピーク波形を示す図。

【図9】 試料膜が2つの膜厚を有する場合の測定スペクトルと近似スペクトルとの関係を示す図。

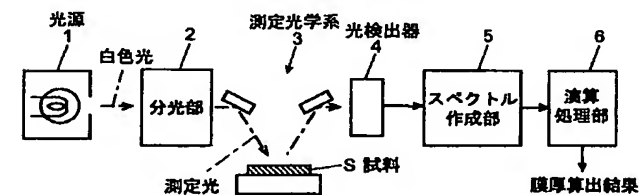
【図10】 試料膜が2つの膜厚を有する場合の、膜厚と最小二乗誤差との関係を示す図。

【図11】 分光測定を利用した膜厚測定の原理を説明するための図。

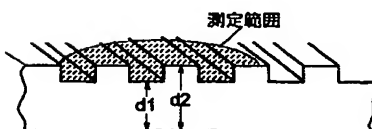
【符号の説明】

- 1…光源
- 2…分光部
- 3…測定光学系
- 4…光検出器
- 5…スペクトル作成部
- 6…演算処理部
- S…試料

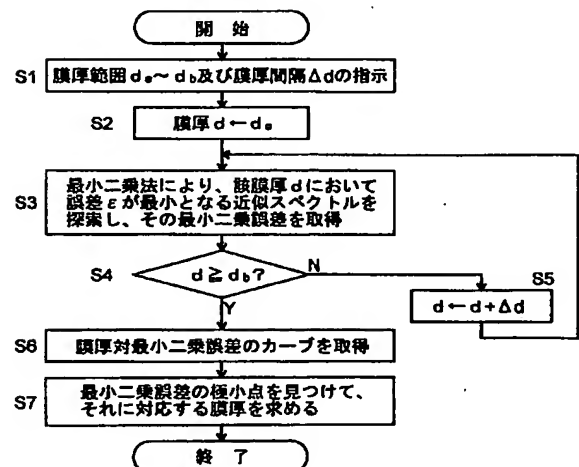
【図1】



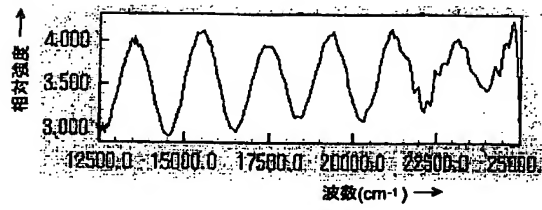
【図6】



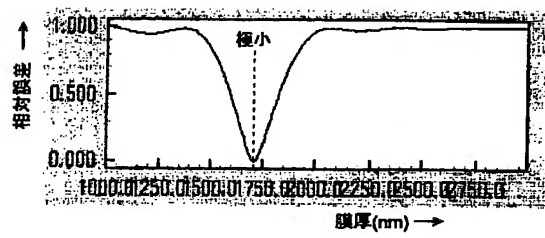
【図2】



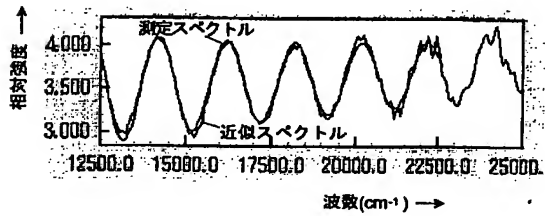
【図3】



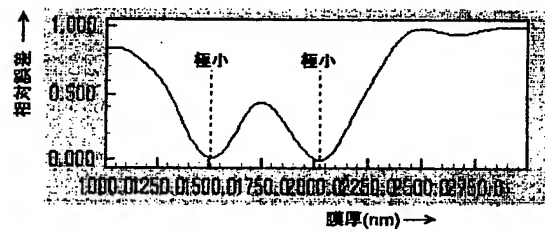
【図4】



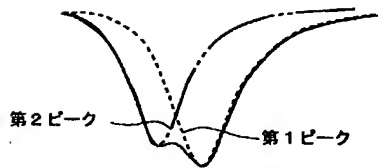
【図5】



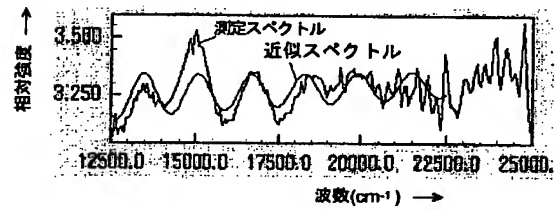
【図7】



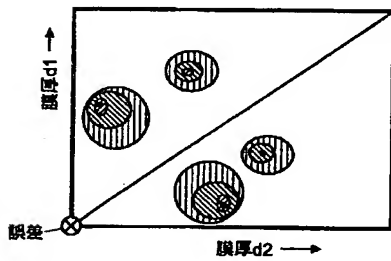
【図8】



【図9】



【図10】



【図11】

